

عملکرد پردازش متناوب در گیاهان

Function of Alternative Splicing in plants

بهمن پناهی^{۱*}، سید ابوالقاسم محمدی^۲

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه ژنومیک، پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی شمال غرب و غرب، پژوهشگاه

بیوتکنولوژی کشاورزی ایران (ABRII)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران

۲- استاد، گروه بیوتکنولوژی و به نژادی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

Panahi B^{*1}, Mohammadi SA²

1- Graduated PhD Student, Department of Genomics, Branch for Northwest & West region, Agricultural Biotechnology Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tabriz, Iran

2- Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* نویسنده مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.panahi@abrii.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۶/۲/۳۰ - تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۳)

چکیده

پردازش متناوب فرایندی مولکولی است که با تأثیر روی ژن‌های کد شونده و غیرکد شونده سبب ایجاد انعطاف‌پذیری ترانسکرپتومی و پروتئومی در گیاهان و جانوران می‌شود. اثرات عملکرد پیرایش متناوب از طریق ایجاد ایزوفرم‌های پروتئینی، تغییر در ویژگی‌های عامل‌های نسخه‌برداری، تغییر در جایگذاری پروتئین‌ها و نیز تغییر در ویژگی‌های آنزیمی اعمال می‌شود. یکی از مهم‌ترین اثرهای عملکردی پردازش متناوب در گیاهان، افزایش قابلیت تحمل و سازگاری به انواع تنش‌های زیستی و غیرزیستی می‌باشد. در این مقاله مروری هر یک از اثرهای عملکردی فرایند پردازش متناوب در گیاهان به صورت خلاصه مورد بررسی و بحث قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی

پردازش متناوب

انعطاف‌پذیری

عملکرد

تنش زیستی و غیرزیستی

مقدمه

کشف پدیده‌ای که در آن توالی‌های ویروسی از mRNA اولیه و پیش‌ساز حذف و توالی‌های باقی مانده بهم متصل می‌شوند، منجر به شناسایی و معرفی فرایند پیرایش mRNA شد. همسو با این کشفیات، تئوری‌های تنوع پروتئینی از طریق پیرایش متناوب نیز مطرح و با آزمایشات مختلفی به اثبات رسید. (Glibert 1978) در ابتدا مفهوم پیرایش متناوب^۱ (AS) را مطرح کرد. بعداً این فرایند مسئول تفاوت و اختلاف بین تعداد ژن‌های کد کننده پروتئین و پروتئین‌هایی که در عمل تولید می‌شود، معرفی شد (Panahi et al. 2015).

پیرایش ساختمانی^۲ فرآیندی است که در آن ایترون حذف شده و آگزونها با ترتیبی که در ژنها ظاهر می‌شود، به هم متصل می‌شود. این در حالی است که در فرایند پیرایش متناوب انحراف از این توالی ترجیحی رخ می‌دهد. پیام‌های ضعیف پیرایشی در موقعیت‌های پیرایش متناوب، آگزونها کوتاه‌تر و یا درصد بالای حفاظت‌شدگی در توالی‌های اطراف، آگزونها متناوبی را که در mRNA می‌بالغ قرار می‌گیرد را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Zheng et al. 2005). پیشنهاد شده‌است که سه مکانیسم exon shuffling، آگزون‌شدگی عناصر ترانسپوزونی^۳ و آگزونها با پیرایش ساختمانی منشا پیرایش متناوب می‌باشند (Kim et al. 2008).

مطالعات صورت گرفته نشان دادند که در ۲۱/۸ درصد ژن‌های آرکیدوپسیس تالینا (Wang and Brendel 2006)، ۲۱/۲ درصد ژن‌های برنج (Campbell et al. 2006)، ۲۳ درصد ژن‌های جو (Panahi et al. 2015)، ۱۹ درصد ژن‌های سورگوم (Panahi et al. 2014 b) و حدود سه درصد ژن‌های جلبک Volvox (Kianianmomeni et al. 2014) تحت تاثیر پردازش متناوب قرار می‌گیرند. با توجه به این که مطالعات قبلی مربوط به شناسایی فرایندهای پیرایش متناوب مبتنی بر آنالیز EST^۴ها صورت می‌گرفت و به دلیل محدودیت این آنالیزها در شناسایی این فرایندها نرخ وقوع این فرایند کمتر از میزان واقعی پیش‌بینی می‌شد. لذا با پیشرفت تکنولوژی‌های توالی‌یابی سرتاسر ژنومی و

ظهور تکنولوژی توالی‌یابی نسل بعدی^۵، مشخص شد که فرایند پردازش متناوب در گیاهان یک پدیده نادر نیست و بسیاری از فرایندهای مولکولی را تحت تاثیر قرار می‌دهد (Panahi et al. 2015). بر اساس پیشنهاد (Reddy 2007)، قسمت اعظم ژن‌های حاوی ایترون باید انواع مختلفی از طریق پردازش متناوب تولید کنند. با این وجود، پردازش متناوب در برخی از خانواده ژنی مانند فاکتورهای رونویسی WRKY، MYB و NF-Yها شیوع بیشتری نسبت به ژن‌های دیگر دارند (Panahi et al. 2015). علاوه بر این، تعدادی از مطالعات وقوع پردازش متناوب را به کلیدها و پیام‌های مختص بافت یا مرحله نمو ارتباط می‌دهند و ایزوفورم‌های پردازش متناوب با ریبوزوم مرتبط شده‌است (Reddy 2013).

عملکرد فرایند پردازش متناوب

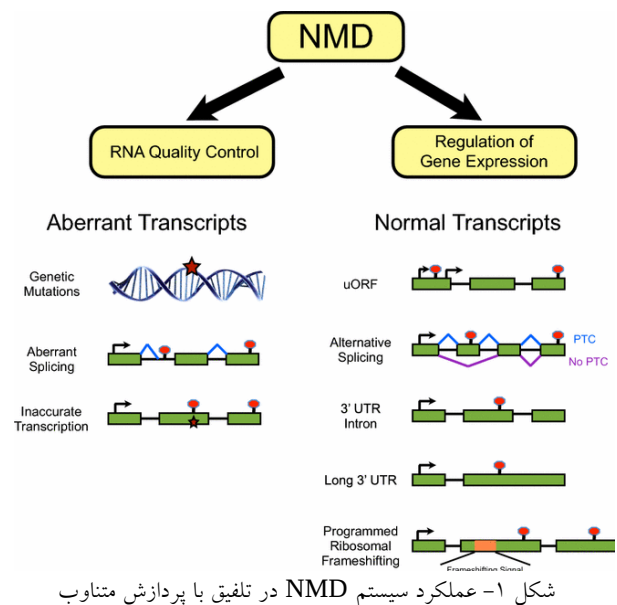
بررسی عملکردی ژن‌هایی که تحت تاثیر پردازش متناوب قرار می‌گیرند، نشان داده است که تنظیم‌کننده‌های پردازشی و عوامل رونویسی جزو گروه‌هایی با نرخ بالای پردازش متناوب می‌باشند (Severing et al. 2012; Panahi et al. 2014a; Panahi et al. 2015). از طرفی دیگر پردازش متناوب می‌تواند باعث معرفی یک چارچوب قرائت و در نتیجه تولید ایزوفورم‌های پروتئینی ناقص شود. از آنجایی که بسیاری از عوامل رونویسی و تنظیم‌کننده‌های پردازش، پروتئین‌های تنظیم‌کننده با مدول‌های عملکردی چندگانه هستند، بنابراین ایزوفورم‌های mRNAی که پروتئین‌های ناقص تولید می‌کنند و حاوی تنها بخشی از مدول‌هایی عملکردی باشند به عنوان تنظیم‌کننده‌های غالب-منفی عمل می‌نمایند. این مکانیسم عمل در فاکتور پیرایش متناوب Smu1 بیان شده‌است (Kanno et al. 2017). مطالعات اخیر، نقش تنظیمی غالب پروتئین‌های ناقص^۶ تولید شده به وسیله پردازش متناوب را در گیاهان ثابت کردند (Liu et al. 2013). در مواردی که پروتئین‌های همو و هترودایمر تولید می‌شود، ایزوفورم‌های حاصل از پردازش متناوب پپتیدهای مداخله‌گر کوچک دخیل در دایمریزاسیون را تولید می‌کنند. در حالی که این پپتیدها فاقد دایمرهای عملکردی می‌باشند و منجر به تشکیل دایمر غیرعملکردی شده و با دایمرهای

¹ Alternative splicing² Constitutive splicing³ Exonization transposable elements⁴ Expression sequence tags⁵ Next generation sequencing⁶ Truncated proteins

عملکردی موجود رقابت می‌کند که منجر به تنظیم غالب-منفی می‌شود (Seo et al. 2013).

پردازش متناوب و سیستم NMD¹

پردازش متناوب هم‌چنین می‌تواند از طریق NMD روی فراوانی رونوشت‌ها تأثیرگذار باشد. NMD یک سیستم تجزیه RNA سیتوپلاسمی می‌باشد که در دور اول ترجمه روی ریبوزوم رخ می‌دهد. بر اساس مدل‌های اخیر، NMD تجزیه رونوشت را هنگامی که پایان ترجمه دچار اختلال می‌شود، القا می‌کند. شکل ۱ عملکرد سیستم NMD را به‌صورت خلاصه بیان کرده است (Reddy et al. 2013).



UPF1، UPF2 و UPF3 پروتئین‌های هسته‌ای مرکزی مسیر NMD می‌باشند و نتایج حذف این پروتئین‌ها، غیرفعال‌سازی مسیر NMD می‌باشد. این پروتئین‌ها آنزیم‌های تجزیه mRNA را روی پایانه ناقص جمع می‌کند. ماشین NMD در گیاهان به شدت حفاظت شده بوده و دارای اورتولوگ‌هایی برای UPF1، UPF2، UPF3 و SMG-7 می‌باشد (Jeong et al. 2011). ویژگی‌های کلاسیک سوسترهای NMD شامل UTR ۳' طویل و ایترون در UTR ۳'، کدون خاتمه ناقص یا PTC در ناحیه ۵۰ تا ۵۵ نوکلئوتید بالا دست نقطه اتصال پردازش و uORF باز بالادستی می‌باشد (Riehs et al. 2008; Vexler et al. 2016).

رونوشت‌های حاصل از پردازش متناوب که تحت تأثیر NMD قرار می‌گیرند، اغلب به‌ندرت قابل شناسایی هستند. با این وجود، در جهش یافته‌هایی که NMD را تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌توان به‌میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش در این رونوشت‌ها را مشاهده کرد. وجود رونوشت‌های حاوی PTC ممکن است تأثیر معنی‌داری روی سطح بیان ژن از طریق کاهش سطوح mRNA پردازش شونده کامل داشته باشند. هنوز به روشنی مشخص نشده است که پردازش متناوب در ناحیه UTR ژن‌ها ممکن است NMD را تشدید کنند. داده‌های اخیر نشان داده است که پردازش متناوب ایترون‌ها در نواحی UTR ۳' و UTR ۵' می‌تواند هدف قرار گرفتن به‌وسیله NMD را تعیین کند (Kalyna et al. 2012). پردازش متناوب در ناحیه UTR ۵' ممکن است حضور، اندازه و موقعیت uORF که NMD را در واریانت‌های پردازش تحریک می‌کند، را تحت تأثیر قرار دهد. عموماً کدون‌های خاتمه uORF‌ها ممکن است به‌عنوان PTC تشخیص داده شود، بنابراین رونوشت‌ها به‌وسیله NMD هدف‌گذاری می‌شود (Kalyna et al. 2012).

مشخص شده‌است که تنظیم پردازش متناوب NMD- در سطوح مختلفی از RNA از قبیل پروتئین‌های متصل شونده به RNA، عوامل پردازش، RNA هلیکازها، اسپلیسوزوم‌ها و پروتئین‌های کمپلکس متصل شونده به نقطه تقاطع تحت تأثیر این نوع از تنظیم بیان ژن قرار می‌گیرند (Kalyna et al. 2012).

اثرات عملکردی پردازش متناوب در نواحی UTR²

اگر چه در فهم دقیق‌تر نتایج و اثرهای ایزوفرم‌های پردازش متناوب هنوز ابهاماتی وجود دارد اما اثرهای بالقوه آن‌ها اخیراً به‌وسیله تجزیه سراسری ژنوم در مخمر و حیوانات مشخص‌تر شده‌است (Wallace and Beggs 2017). بررسی پروفایل سراسری ایزوفرم‌های رونوشت در مخمر ناهمگنی در رونویسی ناشی از پردازش متناوب را با بیش از ۲۶ ایزوفرم رونویسی برای هر ژن رمز کننده پروتئین نشان داده است. این مطالعه نشان داد که بسیاری از RNAهای کوچک دارای کلاهک و دنباله Poly A که ممکن است پپتیدهای کوچکی را رمز کنند، قابل شناسایی هستند (Pelechano et al. 2013). گزارش شده‌است که پپتیدهای فعال با

² Untranslated Region

¹ Nonsense-mediated decay

کوچک¹ (TAS) یا مداخله گر کوچک تراکنشی، منجر به از دست رفتن جایگاه اتصال miRNA و سطوح ایزوفرم های RNA که فاقد جایگاه اتصال miRNA هستند، می شوند (Yang et al. 2012). اعضای خانواده ژنی شبه پروتئین چسبنده به راه انداز اسکاموزها (SPL3, 4 and 5)² که تنظیم کننده های کلیدی انتقال از مرحله رویشی به زایشی می باشند دارای جایگاه اتصال به miR156 می باشند (Wu and Poething 2006). بیان این SPLها به شدت با بیان miR156 رابطه معکوس دارد. SPL4 سه ایزوفرم mRNA تولید می کند اما تنها یک ایزوفرم (SPL4-1) دارای جایگاه هدف miR156 می باشد. مطالعات افزایش بیان با miR156 نشان داده است که سطح رونوشت SPL4-1 با این miRNA تنظیم می شود این در حالی است که در مورد ایزوفرم های دیگر این امر صادق نمی باشد. این یافته ارتباط قوی بین پردازش متناوب و تنظیم بیان ژن به واسطه miRNA را نشان می دهد (Yang et al. 2012).

برخی از مطالعات نشان دادند که ارتباط مستقیم بین پردازش متناوب و بیوژنر miRNA و تنظیم سطح miRNA اولیه وجود دارد (Hirsch et al. 2006; Yan et al. 2012). برخی از ژن های miRNA در گیاهان در درون ایترون ژن های رمزکننده پروتئین هایی قرار دارند و به صورت هماهنگ با ژن های رمزکننده پروتئین ها پردازش و بیان می شوند. در برخی از موارد، پردازش متناوب با تاثیر بر ساختارهای ثانویه مورد نیاز برای بیوژنر miRNA، بیوژنر miRNA را تحت تاثیر قرار می دهد (Hirsch et al. 2006). ژن MIR400 آرابیدوپسیس درون ایترون های ژن رمزکننده At1g32853 قرار دارد و هماهنگ با ژن میزبان رونویسی می شود. نکته جالب توجه این است که گرما، پردازش متناوب این ایترون را کنترل می کند که منجر به افزایش سطح رونوشت اولیه miR400 و کاهش سطح miR400 بالغ می شود (Yan et al. 2012). مشخص شده است که این ارتباط بین پردازش متناوب و بیوژنر miR400، نقش مهمی را در تحمل به تنش گرمایی دارد. هم چنین افزایش بیان miR400 منجر به کاهش جوانه زنی و رشد گیاهچه در شرایط تنش گرما می شود (Yan et al. 2012). مطالعات اخیر نشان داده است که ایترون ها در ژن های

کنترل فعالیت عوامل رونویسی، در ریخت زایی نقش مهمی دارند (Kondo et al. 2010; Zane et al. 2014). مطالعات گسترده واریانت های حاصل از پردازش متناوب با روش های محاسباتی و آزمایشگاهی پیشنهاد می کنند که محصولات پروتئینی حاصل از پردازش متناوب ممکن است شبکه برهم کنش پروتئین-پروتئین را دچار تغییر کرده و روی مسیرهای ترانسائی تاثیر داشته باشند (Panahi et al. 2015). هم چنین بیان شده است که ایزوفرم های ایجاد شده به وسیله پردازش متناوب منجر به ایجاد جفت های ایزوفرمی به خصوص در پروفایل برهم کنش پروتئینی شده و از این طریق اثرات عملکردی گسترده ای به وسیله ایزوفرم های ایجاد شده از یک ژن در سیستم زیستی موجود برجای می گذارد (Yang et al. 2016).

پردازش متناوب تنها در نواحی غیررمز کننده mRNA اولیه رخ نمی دهد، بلکه در نواحی که ترجمه نمی شود نیز این فرآیند رخ می دهد (Palaniswamy et al. 2010). یک موضوع نو ظهور در این زمینه تنظیم پایداری mRNA به وسیله miRNA است که با متاثر شدن نواحی اتصال miRNA، که عمدتاً در نواحی UTR قرار دارند، به وسیله پردازش متناوب در واقع عملکرد mRNA را تغییر می دهد (Kalsotra et al. 2010). مثال قابل ذکر در این مورد می تواند ژن SLC11A2 باشد (Lam and Gros 2010). پردازش متناوب هم چنین با تغییر انتهای کربوکسیل می تواند در پایداری پروتئین تاثیرگذار باشد (Hashimoto et al. 2009).

تغییر در عملکرد و ساختار عوامل تنظیم کننده

پردازش متناوب می تواند بیان ژن را با واسطه ی miRNA و با روش های مختلفی از جمله تولید ایزوفرم های mRNA یا RNAهای غیر رمز کننده و یا فاقد جایگاه هدف miRNA، تنظیم پردازش miRNA اولیه و تعدیل سطوح miRNA، تعدیل کند (Panahi et al. 2014b). تعدیل سطوح miRNA هم چنین با تنظیم الگوی پردازش متناوب مربوط به miRNA اولیه و یا mRNA اولیه رمز کننده آنزیم هایی از قبیل پروتئین های شبه دایسر که در بیوژنر miRNA دخیل می باشند صورت می گیرد (Panahi et al. 2013b). در گیاهان، جایگاه اتصال miRNA در mRNA در هر دو ناحیه رمزکننده و UTR شناسایی شده است. حذف ایترون از mRNA اولیه و برخی از RNAهای ایتروفرنی انتقال دهنده

¹ Transacting small interfering

² Squamosa-promoter binding protein like

می‌شود. اغلب، فرم‌های غیر فعال آنزیم‌ها به‌وسیله کدون‌های خاتمه ناقص تولید می‌شود. همچنین پیرایش متناوب میزان اختصاصی بودن نسبت به سوبستراها را تغییر می‌دهد. به طوری که در مورد فسفو لیپازهای A2 beta سیتوسولی می‌توان این پدیده را مشاهده کرد (Dujardin et al. 2014).

هم‌چنین تغییر در پردازش متناوب، ساختار دمین فعال‌سازی رونویسی را تغییر داده و در نتیجه باعث فعال‌سازی RNA polymerase II هم در جهت مثبت و هم در جهت منفی می‌شود. پرش^۱ اگزون‌های متناوب که دامنه‌های اتصال به DNA را رمز می‌کنند، سبب می‌شود که عوامل رونویسی توانایی خود را برای اتصال به راه‌انداز از دست بدهند. این ایزوفرم‌ها می‌توانند به‌صورت غیر فعال بمانند و یا در جهت غالب منفی فعالیت کنند. این ایزوفرم‌ها به‌وسیله جابجایی ایزوفرم عوامل رونویسی با دامنه اتصال به DNA از کمپلکس عامل رونویسی^۲ قابل دست‌یابی است (Hashimoto et al. 2006; Dujardin et al. 2014).

پردازش متناوب و پاسخ به تنش‌ها

گیاهان در طول دوره رشد و نمو خود اغلب تحت تاثیر عوامل محیطی مختلف از قبیل تنش‌های زیستی و غیرزیستی قرار می‌گیرد. گزارش شده‌است که پردازش متناوب می‌تواند به‌وسیله تنش‌های غیرزیستی از قبیل شوری، خشکی، گرما و سرما (Panahi et al. 2013a; Shahriari Ahmadi et al. 2013; Panahi et al. 2013b; Reddy et al. 2015; Panahi and Mohammadi 2017) و زیستی از قبیل انواع باکتری‌ها و ویروس‌ها (Reddy 2013) تحت تاثیر قرار گیرد. مشخص شده‌است که انواع تنش‌ها باعث تغییر در دینامیک برهم کنشی پروتئین‌ها و بروز پاسخ‌های فیزیولوژیکی متفاوت در برابر این تنش‌ها می‌شود (Panahi and Mohammadi 2017). بیان شده‌است که تغییرات بیان در فاکتورهای پردازشی رویکرد اصلی تعیین پیرایش متناوب در پاسخ به تنش‌ها می‌باشند (Stalger and Brown 2013).

Cui et al. (2014) نشان دادند که افزایش بیان فاکتور پیرایشی SAD1 باعث افزایش دقت پیرایشی و بهبود مقاومت به تنش شوری در *Arabidopsis thaliana* می‌شود.

¹ Skipping

² Transcription factor complex

miRNA (MIR161, MIR163, MIR172a) تولید می‌دهند (Bielewicz et al. 2013; Schwab et al. 2013). پردازش متناوب علاوه بر تنظیم پردازش miRNA اولیه، به‌صورت غیر مستقیم با تنظیم پردازش mRNA، آنزیم‌هایی دخیل در بیوژنز miRNA را نیز کنترل می‌کند.

پردازش متناوب در اینترون‌های آنزیم شبه دایسر^۱ (DCL1)، چهار ایزوفرم (DCL1-1, 2, 3, 4) تولید می‌کند که یکی از این ایزوفرم‌ها دارای جایگاه هدف miRNA می‌باشد (Rogers and Chen 2013). بنابراین، پردازش متناوب، سطح پروتئین DCL1 را تنظیم می‌کند (Yang et al. 2012). رونویسی به‌وسیله تشکیل کمپلکس‌های پروتئینی روی توالی‌های راه‌اندازی در DNA کنترل می‌شود. با توجه به این‌که این کمپلکس‌های پروتئینی به‌وسیله پیوندهای ضعیف ایجاد می‌شوند، بنابراین نقاط تنظیمی چندگانه‌ای را برای واریانت‌های پردازش متناوب ایجاد می‌کنند که به‌صورت عمومی اتصال آن‌ها را به DNA یا کمپلکس‌های پروتئینی دیگر تعدیل می‌کنند.

تغییر در جایگذاری پروتئین‌ها

پردازش متناوب می‌تواند از طریق تاثیر روی توالی‌های پیام رسانی، محل تغییرات پس ترجمه و یا جایگاه برهم کنش با پروتئین‌های دیگر باعث تغییر در جایگذاری پروتئین‌های درون سلولی شود. این تغییرات می‌تواند باعث ایجاد نتایج کلی یا بدون هیچ نتیجه‌ای باشد. بسیاری از این تغییرات به‌صورت تدریجی هستند. به‌عنوان مثال، اگزون‌های متناوب باعث تغییر در توزیع ایزوفرم‌های پروتئینی بین قسمت‌های مختلف یک سلول می‌شوند، به‌طوری که در مورد واریانت‌های ING4 این امر قابل مشاهده است (Unoki et al. 2006). همچنین پیشنهاد شده‌است که عوامل پردازشی می‌توانند با ارسال پروتئین‌های تنظیمی کلیدی به قسمت‌های مختلف سلولی، متابولیسم چربی را کنترل کند.

تغییر در ویژگی‌های آنزیمی

پردازش متناوب می‌تواند باعث تغییر در ویژگی‌های آنزیمی شود. به‌عنوان مثال، پردازش متناوب عمدتاً با حذف قسمت‌های پروتئینی متناوب از مناطق مرکزی باعث غیر فعال شدن آنزیم‌های کیناز می‌شود. در بسیاری از موارد، تغییر در تعداد اگزون‌های متناوب در محصول نهایی منجر به از بین رفتن فعالیت آنزیم

دمای پایین نیز تغییر در پردازش متناوب بسیاری از ژن‌ها را القا می‌کند (Iida et al. 2004; Laloum et al. 2017). به‌عنوان مثال، در سیب‌زمینی (*Solanum tubersum*) تحت دماهای پایین، تبدیل نشاسته به ساکارز و گلوکز به فروکتوز به‌وسیله اسید اینورتاز انجام می‌گیرد و این پدیده منجر به شیرین شدن سیب‌زمینی می‌شود. گزارش شده‌است که پردازش یک مینی اگزون، که قسمتی از جایگاه فعال یک ژن اینورتاز را تشکیل می‌دهد، در پاسخ به سرما تغییر می‌کند (Bournay et al. 1996; Laloum et al. 2017). ژنوتیپ‌هایی که تحمل بالایی به شیرین شدن ناشی از سرما دارند دو واریانت پردازش متناوب با بیان بالا ($INH2\alpha$ و $INH2\beta$) از ژن مهارکننده اینورتاز ($INH2$) نشان دادند (Brummell et al. 2011). سرما هم‌چنین پردازش متناوب را در عامل رونویسی $IDD14$ ⁴ تنظیم می‌کند. این عامل، رونویسی بیان آنزیم تجزیه‌کننده $QUA-QUINE$ STARCH را که منجر به مهار تجمع نشاسته می‌شود، انجام می‌دهد (Seo et al. 2011b). در دمای پایین، پردازش متناوب از نوع حفاظت اینترون منجر به تولید پروتئین‌هایی می‌شود که فاقد دمین اتصال شونده به DNA هستند. این پروتئین غیر عملکردی بوده و نهایتاً باعث تجمع نشاسته می‌شوند (James et al. 2012).

پردازش متناوب و پاسخ به تنش‌های زیستی ژن N^5 در تنباکو (*Nicotina tabacum*) عضوی از کلاس LRR^6 می‌باشد که موجب افزایش مقاومت به ویروس موزائیک تنباکو (TMV^7) می‌شود (Whitham et al. 1994). پردازش متناوب منجر به تولید دو رونوشت از این ژن می‌شود. رونوشت کوچک Ns که پروتئین عملکردی N را رمز می‌کند و رونوشت بلند NL پروتئین غیر عملکردی را ایجاد می‌کند. رونوشت NL دارای اگزون متناوب ۷۰ نوکلئوتیدی در بین اینترون سوم می‌باشد که منجر به ایجاد تغییر در چارچوب قرائت و یک PTC می‌شود (Dinesh-Kumar and Baker 2000). بنابراین، NL می‌تواند یک پروتئین ناقص که فاقد بسیاری از LRRها می‌باشد را تولید کند. Ns قبل از آلودگی فراوانی بالایی دارد، در حالی که NL حدود ۴

پردازش متناوب و پاسخ به تنش‌های غیر زیستی در گندم (*Triticum aestivum*) همولوگ ژن $DREB2$ ($WDREB2$) که یک عامل رونویسی است تحت تاثیر تنش‌های غیر زیستی متعددی، سه رونوشت ناشی از پردازش متناوب با عمل متفاوت را تولید می‌کند. تحت شرایط تنش‌های شوری، خشکی و سرما، میزان عامل رونویسی $WDREB2$ به‌صورت متفاوتی در سطوح رونویسی و پردازش متناوب کنترل می‌شود. $WDREB2$ از طریق دو مسیر وابسته به ABA (آبسیزیک اسید) (پاسخ به شوری و خشکی) و مستقل از ABA (پاسخ به سرما) تنظیم می‌شود. این امر نشان می‌دهد که تغییرات معنی‌داری در عوامل پردازش در شرایط تنش رخ می‌دهد و این امر به نوبه خود الگوی پردازش متناوب را در رونوشت‌های $WDREB2$ تغییر می‌دهد (Egawa et al. 2006).

عامل رونویسی شوک حرارتی (Hsf s)¹ دارای نقش کلیدی در واکنش گیاهان به دماهای بالا یا شوک‌های حرارتی بوده و با اتصال به عناصر آغازگر شوک حرارتی، به‌عنوان مثال ژن‌های پروتئین شوک حرارتی، به این شرایط پاسخ می‌دهد (von Koskull-Doring et al. 2007; Neueder et al. 2014). گزارش شده‌است که ژن $HsfA2$ آرآبیدوپسیس تحت تاثیر تنظیم پس از ترجمه و افزایش رونویسی ناشی از گرما قرار می‌گیرد. در گیاهان قرارگیری در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد، سبب ایجاد یک مینی اگزون ۳۱ جفت‌بازی در اینترون حفاظت شده در دمین اتصال شونده به DNA به رونوشت پردازش شده می‌شود. این اگزون یک $PTC2$ را معرفی کرده و ایزوفرم پردازش متناوب $HsfA2II$ را به NMD مورد هدف قرار می‌دهد، بنابراین مکانیسمی را برای تعیین سطوح فعال پروتئین $HsfA2$ فراهم می‌کند (Sugio et al. 2009). در دمای ۴۲ درجه سانتی‌گراد، واریانت دیگر پردازش متناوب، $HsfA2III$ به محض کاهش سطح $HsfA2II$ ظاهر می‌یابد (Liu et al. 2013). این پروتئین ناقص موتیف متصل شونده به DNA مارپیچ-خم مارپیچ^۳ را نگه داشته و باعث جایگیری در هسته و اتصال به آغازگر $HsfA2$ می‌شود.

⁴ Interminante domaine 4

⁵ Tobacco Mosaic Virus resistance gene N

⁶ leucine-rich repeat region

⁷ Tobacco mosaic virus

¹ Heat shock transcription factors

² Premature termination codons

³ Hsf helix-turn-helix

صورت می‌گیرد. تنظیم پردازش متناوب در این مورد به‌نظر می‌رسد که میزان فعالیت ژن مقاومت را تنظیم کرده و ممکن است صدمه ناشی از پروتئین فعال RPS4 را محدود کند.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی‌های نشان می‌دهد که فرایند پردازش متناوب در گیاهان از طریق تغییر در ویژگی‌های ساختاری و دمین‌های عملکردی باعث تغییر در برهم‌کنش‌ها و عملکردهای تنظیم‌کننده‌های اساسی در سطوح نسخه‌برداری، ترجمه و پس از ترجمه شده و از این طریق انعطاف‌پذیری سلول را در پاسخ به انواع شرایط فیزیولوژیکی افزایش می‌دهد.

منابع

- Bielewicz D, Kalak M, Kalyna M, Windels D, Barta A, Vazquez F, Szweykowska-Kulinska Z, and Jarmolowski A (2013) Introns of plant pri-miRNAs enhance miRNA biogenesis. *EMBO Report* 14:622-628.
- Bournay AS, Hedley PE, Maddison A, Waugh R, and Machray G (1996) Exon skipping induced by cold stress in a potato invertase gene transcript. *Nucleic Acids Research* 24:2347-2351.
- Brummell DA, Chen RKY, Harris JC, Zhang H, Hamiaux C, Kralicek AV, and McKenzie MJ (2011) Induction of vacuolar invertase inhibitor mRNA in potato tubers contributes to coldinduced sweetening resistance and includes spliced hybrid mRNA variants. *Journal of Experimental Botany* 62:3519-3534.
- Campbell M, Haas B, Hamilton J, Mount S, and Buell CR (2006) Comprehensive analysis of alternative splicing in rice and comparative analyses with Arabidopsis. *BMC Genomics* 7:327-332.
- Dinesh-Kumar SP, and Baker BJ (2000) Alternatively spliced N resistance gene transcripts: Their possible role in tobacco mosaic virus resistance. *Proceeding of National Academic Science USA* 97:1908-1913.
- Dujardin G, Lafaille C, de la Mata M, Marasco, Luciano E, Muñoz Manuel J, Le Jossic-Corcós C, Corcos L, Kornblihtt, Alberto R (2014) How Slow RNA Polymerase II Elongation Favors Alternative Exon Skipping. *Molecular Cell* 54:683-690.
- Egawa C, Kobayashi F, Ishibashi M, Nakamura T, Nakamura C, and Takumi S (2006) Differential regulation of transcript accumulation and alternative splicing of a DREB2 homolog under abiotic stress conditions in common wheat. *Genes and Genetic System* 812:77-91.
- Gilbert W (1978) Why genes in pieces? *Nature* 271: 501.
- Hashimoto K (2009) A liver X receptor LXR-beta alternative splicing variant LXRBSV acts as an RNA co-activator of LXR-beta. *Biochemistry and Biophysics Research Communication* 390:1260-1265.

تا ۸ ساعت بعد از آلودگی ویروسی ظهور می‌یابد و غلظت آن به حدود ۶۰ برابری Ns می‌رسد. گیاهان تراریخته که تنها Ns را بیان می‌کند، مقاومت کمی را در برابر TMV نسبت به حالتی که هر دو رونوشت تولید می‌شود، نشان دادند. بنابراین، اگر در متناوب در اینترون ۳ برای مقاومت کامل بر علیه TMV ضروری می‌باشد (Dinesh-Kumar and Baker 2000; Yang et al. 2014).

زانگ و گاسمن (Zhang and Gassmann 2007) بیان کردند که ژن مقاومت به بیماری RPS4 در آرابیدوپسیس رونوشت‌های متعددی را از طریق پردازش متناوب تولید می‌کنند. مشخص شده است که تنظیم عملکردی RPS4 در سطوح مختلف و به‌صورت تنظیم پویای نسبت ایزوفرم‌های پردازش متناوب در طول بیماری

- Hirsch J, Lefort V, Vankersschaver M, Boualem A, Lucas A, Thermes C, d'Aubenton-Carafa Y, and Crespi M. (2006) Characterization of 43 non-protein-coding mRNA genes in Arabidopsis, including the MIR162a-derived transcripts. *Plant Physiology* 140:1192-1204.
- Iida K, Shionyu M, and Suso Y (2008) Alternative splicing at NAGNAG acceptor sites shares common properties in land plants and mammals. *Molecular Biology of Evolution* 25:709-718.
- James AB, Syed NH, Bordage S, Marshall J, Nimmo GA, Jenkins GI, Herzyk P, Brown JW, and Nimmo HG (2012) Alternative splicing mediates responses of the Arabidopsis circadian clock to temperature changes. *Plant Cell* 24:961-981.
- Jeong HJ, Kim YJ, Kim SH, Kim YH, Lee IJ, Kim YK and Shin JS (2011) Nonsense-mediated mRNA decay factors, UPF1 and UPF3, contribute to plant defense. *Plant and Cell Physiology* 52:2147-2156.
- Kalsotra A, Wang K, Li P-F and Cooper TA (2010) MicroRNAs coordinate an alternative splicing network during mouse postnatal heart development. *Genes and Development* 24:653-658.
- Kalyna M (2012) Alternative splicing and nonsense-mediated decay modulate expression of important regulatory genes in Arabidopsis. *Nucleic Acids Research* 40:2454-2469.
- Kanno T, Lin W-D, Fu JL, Matzke AJM, Matzke M (2017) A genetic screen implicates a CWC16/Yju2/CCDC130 protein and SMU1 in alternative splicing in Arabidopsis thaliana. *RNA* 23:1068-1079.
- Kianianmomeni A, Ong CS, Ratsch G and Hallmann A (2014) Genomewide analysis of alternative splicing in *Volvox carteri*. *BMC Genomics* 15:1117-1125.
- Kim E, Goren A and Ast G (2008) Alternative splicing: current perspectives. *Bioessays* 30:38-47.
- Kondo T, Plaza S, Zanet J, Benrabah E, Valenti P, Hashimoto Y, Kobayashi S, Payre F, and Kageyama Y

- (2010) Small peptides switch the transcriptional activity of Shavenbaby during *Drosophila* embryogenesis. *Science* 329:336-339.
- Laloum T, Martín G and Duque P (2017) Alternative Splicing Control of Abiotic Stress Responses. *Trends in Plant Science*. doi: 10.1016/j.tplants. 09.019.
- Lam-Yuk-Tseung S and Gros P (2006) Distinct Targeting and Recycling Properties of Two Isoforms of the Iron Transporter DMT1 (NRAMP2, Slc11A2). *Biochemistry* 45:2294-2301.
- Liu J, Sun N, Liu M, Liu J, Du B, Wang X and Qi X (2013) An autoregulatory loop controlling Arabidopsis HsfA2 expression: role of heat shock-induced alternative splicing. *Plant Physiology* 162:512-521.
- Neueder A, Achilli F, Moussaoui S and Bates GP (2014) Novel Isoforms of Heat Shock Transcription Factor 1, HSF1 γ α and HSF1 γ β , Regulate Chaperone Protein Gene Transcription. *The Journal of Biological Chemistry* 289:19894-19906.
- Palaniswamy R, Teglund S, Lauth M, Zaphiropoulos PG, Shimokawa T (2010) Genetic variations regulate alternative splicing in the 5' untranslated regions of the mouse glioma-associated oncogene 1, Gli1. *BMC Molecular Biology* 11:32.
- Panahi B, Abbaszadeh B, Taghizadeghan, M and Ebrahimie E (2014b) Genome-wide survey of alternative splicing in *Sorghum bicolor*. *Physiology and Molecular Biology of Plant* 203:323-329.
- Panahi B, Ebrahimie Khaksefied R, Afzal Sarikhanbagloo R, Mohammadi SA, Ebrahimie E (2014a) Gene Ontology of Alternative Splicing affected genes in *Arabidopsis thaliana*. First International Genetic Congress, Tehran, Iran, Jun 2014. (Abstrac).
- Panahi B, Mohammadi SA (2017) Dynamic interaction network of Alternative splicing genes in different physiological condition. 3rd International Conference on Agricultural Engineering and Natural Resources. Tehran, Iran, Jul 2017.
- Panahi B, Mohammadi SA and Ebrahimie E (2013b) Identification of miRNAs and their potential targets in halophyte plant *Thellungiella halophila*. *Biotechnologia* 94:285-290
- Panahi B, Mohammadi SA, Ebrahimi Khaksefidi R, Fallah Mehrabadi J, Ebrahimie E (2015) Genome-wide analysis of alternative splicing events in *Hordeum vulgare*: Highlighting retention of intron-based splicing and its possible function through network analysis. *FEBS Letter* 589:3564-75
- Panahi B, Shahriari Ahmadi F, Marashi H, Zare M and Moshtaghi N (2013a) Molecular cloning and expression analysis of Na⁺/H⁺ antiporter in monocot halophyte *Leptochloa fusca* L. *NJAS-Wageningen Journal of Life Science* 65:87-93.
- Pelechano V, Wei W and Steinmetz LM (2013) Extensive transcriptional heterogeneity revealed by isoform profiling. *Nature* 497:127-131.
- Reddy ASN (2004) Plant serine/arginine-rich proteins and their role in pre-mRNA splicing. *Trends in Plant Science* 9:541-547.
- Reddy ASN, Marquez Y, Kalyna M and Barta A (2013) Complexity of the alternative splicing landscape in plants. *Plant Cell* 25:3657-3683.
- Riehs N, Akimcheva S, Puizina J, Bulankova P, Idol RA, Siroky J, Schleiffer A, Schweizer D, Shippen DE and Riha K (2008) Arabidopsis SMG7 protein is required for exit from meiosis. *Journal of Cell Science* 121:2208-2216.
- Rogers K and Chen X (2013) Biogenesis, turnover, and mode of action of plant microRNAs. *Plant Cell* 25:2383-2399
- Seo PJ, Hong SY, Kim SG and Park CM (2011) Competitive inhibition of transcription factors by small interfering peptides. *Trends in Plant Science* 16: 541-549.
- Seo PJ, Park MJ and Park CM (2013) Alternative splicing of transcription factors in plant responses to low temperature stress: Mechanisms and functions. *Planta* 237:1415-1424.
- Severing EI, van Dijk AD, Morabito G, Busscher-Lange J, Immink RG and van Ham RC (2012) Predicting the impact of alternative splicing on plant MADS domain protein function. *PLoS ONE* 7:e30524.
- Shahriari Ahmadi F, Panahi B, Marashi H, Moshtaghi N, Mirshamsi Kakhki A (2013) Coordinate up-regulation of vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter and V-PPase to early time salt stress in monocot halophyte *Leptochloa fusca* roots. *Journal of Agricultural Science and Technology* 15:369-376.
- Sugio A, Dreos R, Aparicio F and Maule AJ (2009) The cytosolic protein response as a subcomponent of the wider heat shock response in Arabidopsis. *Plant Cell* 21:642-654.
- Unoki M, Shen JC, Zheng ZM and Harris CC (2006) Novel splice variants of ING4 and their possible roles in the regulation of cell growth and motility. *Journal of Biological Chemistry* 281:34677-34686.
- Vexler K, Cymerman MA, Berezin I, Fridman A, Golani L, Lasnoy M, Saul H, Shaul O (2016) The Arabidopsis NMD Factor UPF3 Is Feedback-Regulated at Multiple Levels and Plays a Role in Plant Response to Salt Stress. *Frontiers in Plant Science* 7: 1376.
- von Koskull-Döring P, Scharf KD and Nover L (2007) The diversity of plant heat stress transcription factors. *Trends in Plant Science* 12:452-457.
- Wallace EWJ and Beggs JD (2017) Extremely fast and incredibly close: cotranscriptional splicing in budding yeast. *RNA* 23:601-610.
- Wang BB and Brendel V (2006) Genomewide comparative analysis of alternative splicing in plants. *Proceeding of National Academy of Science USA* 103:7175-7180.
- Whitham S, Dinesh-Kumar SP, Choi D, Hehl R, Corr C, and Baker B (1994) The product of the tobacco mosaic virus resistance gene N: Similarity to toll and the interleukin-1 receptor. *Cell* 78:1101-1115.
- Wu G and Poethig RS (2006) Temporal regulation of shoot development in Arabidopsis thaliana by miR156 and its target SPL3. *Development* 133:3539-3547.
- Yang GD, Yan K, Wu BJ, Wang YH, Gao YX and Zheng, CC (2012) Genomewide analysis of intronic microRNAs in rice and Arabidopsis. *Journal of Genetic* 91:313-324.

Yang S, Tang F And Zhu H (2014) Alternative Splicing in Plant Immunity. *International Journal of Molecular Sciences* 15:10424.

Yang X, Coulombe-Huntington J, Kang S, Sheynkman GM, HaoT, Richardson A, Sun S, Yang F, Shen YA, Murray RR, Spirohn K, Begg BE, Duran-Frigola M, MacWilliams A, Pevzner SJ, Zhong Q, Trigg SA, Tam S, Vidal M (2016) Widespread expansion of protein interaction capabilities by alternative splicing. *Cell* 164:805-817.

Zane AC, Michelet C, Roehrich A, Emani PS and Drobny GP (2014) Silica Morphogenesis by Lysine-Leucine Peptides with Hydrophobic Periodicity. *Langmuir* 30:7152-7161

Zhang XC and Gassmann W (2003) RPS4-mediated disease resistance requires the combined presence of RPS4 transcripts with full-length and truncated open reading frames. *Plant Cell* 15:2333-2342.

Zheng CL, Fu XD, Gribskov M (2005) Characteristics and regulatory elements defining constitutive splicing and different modes of alternative splicing in human and mouse. *RNA* 11:1777-1787.